

Techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols dégradés en régions semi-arides d'Afrique occidentale

Éric ROOSE

Robert ZOUGMORE

Leo STROOSNIJDER

Patrick DUGUÉ

Ibrahim BOUZOU-MOUSSA

Introduction : la réduction de la productivité des sols

La restauration de la productivité des sols et la réhabilitation du couvert végétal sont des enjeux vitaux pour les populations rurales de la zone soudano-sahélienne. En effet, suite à la pression démographique et socio-économique, à l'introduction de techniques peu durables de production, au surpâturage et à la surexploitation des ressources énergétiques (déforestation autour des villes et villages), on observe un raccourcissement du temps de jachère, la baisse des rendements des cultures malgré la fertilisation organo-minérale apportée, la dégradation des propriétés du sol liées à sa fertilité et la dénudation des terres dégradées (> 20 % des surfaces cultivables). Les causes proviennent, entre autres, du déséquilibre du bilan minéral (érosion sélective et exportations minérales non compensées par la fumure) et du bilan organique (érosion sélective et surtout minéralisation

des MO du sol accélérée par le labour) (ROOSE, 1981 ; PIERI, 1989 ; STROOSNIJDER, 1998 ; ROOSE et BARTHÈS, 2006 ; BILLAZ, 2012).

Il s'ensuit une réduction du taux de MO du sol, la dégradation de l'infiltration, une augmentation du ruissellement (STROOSNIJDER et HOOGLMOED, 1984), de l'érosion en nappe et du ravinement (ROOSE, 1994). Suite à l'augmentation rapide du coût des engrais minéraux, on a bien tenté de restituer au sol une partie de la biomasse sous forme d'enfouissement des résidus de culture, de compost ou de fumier, mais ces restitutions ne compensent qu'une faible partie des éléments exportés (30 % au max. des exportations par les récoltes et pertes par érosion, lixiviation et gazéification). On verra dans cet ouvrage les tentatives intéressantes de jachères courtes de légumineuses (Barthès *et al.* au Bénin ; Peltier au Congo-RDC ; Harmand au Nord-Cameroun ; Razafindrakoto à Madagascar). Depuis 60 ans, on a testé de nombreuses techniques de lutte antiérosive, de conservation de l'eau et des sols (CES) généralement mises au point en milieux tempérés européens ou américains (ROOSE, 1993), mais avec peu de succès : les analyses de HUDSON (1991) ont révélé l'échec de 75 % des projets à grande échelle. Ces échecs proviennent tant des techniques mal adaptées aux conditions tropicales (pluies très agressives, sols superficiels sablo-limoneux à structure fragile, pauvres en nutriments, acides, argile kaolinique à faible réserve en bases et en eau utile) qu'aux conditions socio-économiques ou culturelles des petits paysans africains qui répliquent « pourquoi consacrer tant de travail à conserver des sols qui sont déjà épuisés chimiquement et dégradés physiquement et biologiquement » ?

Dans ce chapitre, nous allons analyser les techniques traditionnelles de restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux semi-arides d'Afrique occidentale, techniques souvent abandonnées durant les années humides (1950-1970), puis redécouvertes et améliorées depuis les années 1990 (suite aux périodes sèches) (WRIGHT, 1982 ; CRITCHLEY *et al.*, 1992 ; ROOSE *et al.*, 1993 ; ROOSE, 1994 ; MAZZUCATO et NIEMEIJER, 2000 ; ZOUGMORE *et al.*, 2003, 2004, 2008, 2009).

Le milieu

La zone soudano-sahélienne est encadrée au Nord par des zones sahéliennes arides exclusivement pastorales et au Sud par les zones tropicales agro-sylvo-pastorales semi-humides. Cette région de transition reçoit 350 à 800 mm de pluie en 4 à 6 mois chauds durant lesquels on observe souvent des périodes de sécheresse de 1 à 3 semaines et des problèmes de débuts tardifs et de fins précoces de saison pluvieuse rendant difficile le calage des cycles culturaux. Les averses sont souvent intenses et associées à des vents violents : en début de saison, les orages de 30 à 60 mm tombant sur les sols nus labourés peu

stables forment des croûtes de battance à la surface du sol entraînant une chute de la capacité d'infiltration (de plus de 60 mm/h à moins de 3-10 mm/heure) et le développement de ruissellement abondant pouvant atteindre 80 % des pluies malgré les pentes faibles (glacis de 1 à 3 %). La gestion de la couverture et de l'état de la surface du sol est donc très importante pour assurer un bilan hydrique harmonieux pour le développement des cultures et leur fructification. Contrairement au milieu méditerranéen voisin, la saison culturale a lieu en pleine saison chaude et l'ETP atteint 2 000 mm par an et plus de 150 mm par mois en période humide. Il est donc essentiel de développer des stratégies de capture et de stockage des pluies et du ruissellement pour faire face aux besoins hydriques des cultures (STROOSNIJDER et HOOGLMOED, 1984 ; ROOSE *et al.*, 1993).

Les paysages des savanes soudano-sahéliennes

Les zones granitiques et gréseuses donnent lieu à des collines cuirassées de sols gravillonnaires superficiels sur cuirasses, de longs glacis de sols ferrugineux sur cuirasses de plus en plus profonds et lessivés ou hydromorphes aboutissant à des vallées évasées aménagées en mares, d'où se répand tranquillement le faible drainage de ces grands paysages. Ces sols sont sablo-limoneux, pauvres en MO, acides, carencés en N et P, peu stables, battant et facilement érodibles mais assez faciles à travailler. Sur roches vertes riches en minéraux ferro-magnésiens, on observe des collines arrondies à pentes caillouteuses plus fortes et bas-fonds larges de sols bruns vertiques ou de vertisols beaucoup plus riches chimiquement, mais plus argileux (argiles gonflantes) et plus difficiles à gérer en saison des pluies. Le ruissellement passe de 2 % en milieu naturel protégé à plus de 30 % des pluies annuelles et plus de 70 % des grosses averses, en milieu cultivé sarclé. Même sur des pentes de 1 à 3 %, les pertes en terre sous culture conventionnelle (un labour et deux sarclages) atteignent 20 à 30 t/ha/an (ROOSE, 1994). Plus grave encore : le ruissellement étalé sur de faibles pentes entraîne de façon sélective les MO et les argiles + limons les plus riches vers les bas-fonds, accélérant ainsi la dégradation des sols cultivés. La végétation « naturelle » est une savane arbustive dans le Sud et des steppes dans le Nord entrecoupées de forêts sèches protégées et de forêts galeries le long des rivières. Cependant, cette végétation reflète les pratiques ancestrales de parcours et de feux de brousse qui favorisent la savane herbeuse. Les cultures vivrières principales sont des céréales (sorgho et un peu de maïs sur les terres sablo-argileuses, et le mil dans le Nord et sur terres sableuses ou gravillonnaires) et quelques légumineuses (arachide et niébé) et condiments. Les seules productions commercialisées sont le coton sur les meilleures terres du Sud, l'arachide, le niébé et les légumes dans les bas-fonds. Les familles paysannes ne sont généralement pas autosuffisantes en céréales : la vente des ruminants et des légumes constituent les principales sources de revenu. C'est une zone de contact entre les peuples d'éleveurs nomades (Peulh) et les agriculteurs sédentarisés depuis longtemps (Mossi, Senoufo, Bambara, Haoussa, etc.). La densité de population est très variable de moins de 30 à plus de 200 hab./km² en fonction des disponibilités en eau, de l'histoire et des zones urbaines. Traditionnellement, la terre appartient à la

communauté villageoise et aux familles fondatrices du village : un chef de terre issu de ces familles est responsable de la distribution des droits d'usage du sol, des parcours et des arbres entre les villageois. Le droit moderne, dans ces régions, fait qu'en dernier ressort la terre non aménagée appartient à l'État, mais l'administration intervient rarement dans la répartition du foncier, sauf en cas de conflits graves ou d'expropriation (routes, mines, etc.). Le fait que les zones pastorales et les résidus de culture constituent des ressources communes, entraîne des tensions entre les agriculteurs et les éleveurs de passage sur les champs récoltés, les jachères et les parcours. Par ailleurs, les codes forestiers stipulent que les arbres spontanés et même plantés dans les champs ne sont pas la propriété exclusive des usufruitiers de la terre : la valorisation du bois implique de payer des taxes d'abattage. L'ensemble de ces règles rend difficile la diffusion des techniques d'agroforesterie et d'aménagement des terres à l'échelle du bassin versant (HIEN 1995 ; KABORÉ, 2009).

Les techniques traditionnelles de gestion de l'eau

Face aux problèmes de ruissellement abondant provenant des collines surpâturées et des zones brûlées, tassées, encroûtées ou dénudées (*zipellé* au Burkina Faso, *zarma* au Niger), les paysans ont développé progressivement toute une gamme de structures susceptibles de ralentir le ruissellement, de capter les sédiments et les MO flottantes (fig. 1) (ROOSE, 1994 ; DUGUÉ *et al.*, 1993, 1994 ; TEMESGEN *et al.*, 2012).

Les alignements de pierres ou de touffes d'herbes, les fascines de piquets et de paille

Ce sont des obstacles perméables aux nappes ruisselantes, établis en courbes de niveau sur un seul rang. Ils ralentissent le ruissellement, l'étalent sur quelques mètres en amont du micro-barrage perméable, en même temps que les sédiments arrachés en amont et filtrent les résidus organiques flottants (pailles, fèces, graines et MO grossière du sol). Chaque alignement forme en amont une zone de 2 à 5 m, enrichie en eau, MO et en nutriments. En saison sèche, ces barrières piègent les limons et les sables emportés par l'érosion éolienne. Les termites sont attirées par ces MO., creusent des galeries et améliorent la capacité d'infiltration de cette zone. Il s'y développe alors quantité d'herbes et d'arbustes qui renforcent cette « ligne de défense » (ROOSE, 1994 ; MANDO *et al.*, 1999 ; ZOUGMORE *et al.*, 2009).

Le danger provient du colmatage de ces alignements et de l'eau qui trouve une issue et finit par creuser en aval une rigole par accélération du

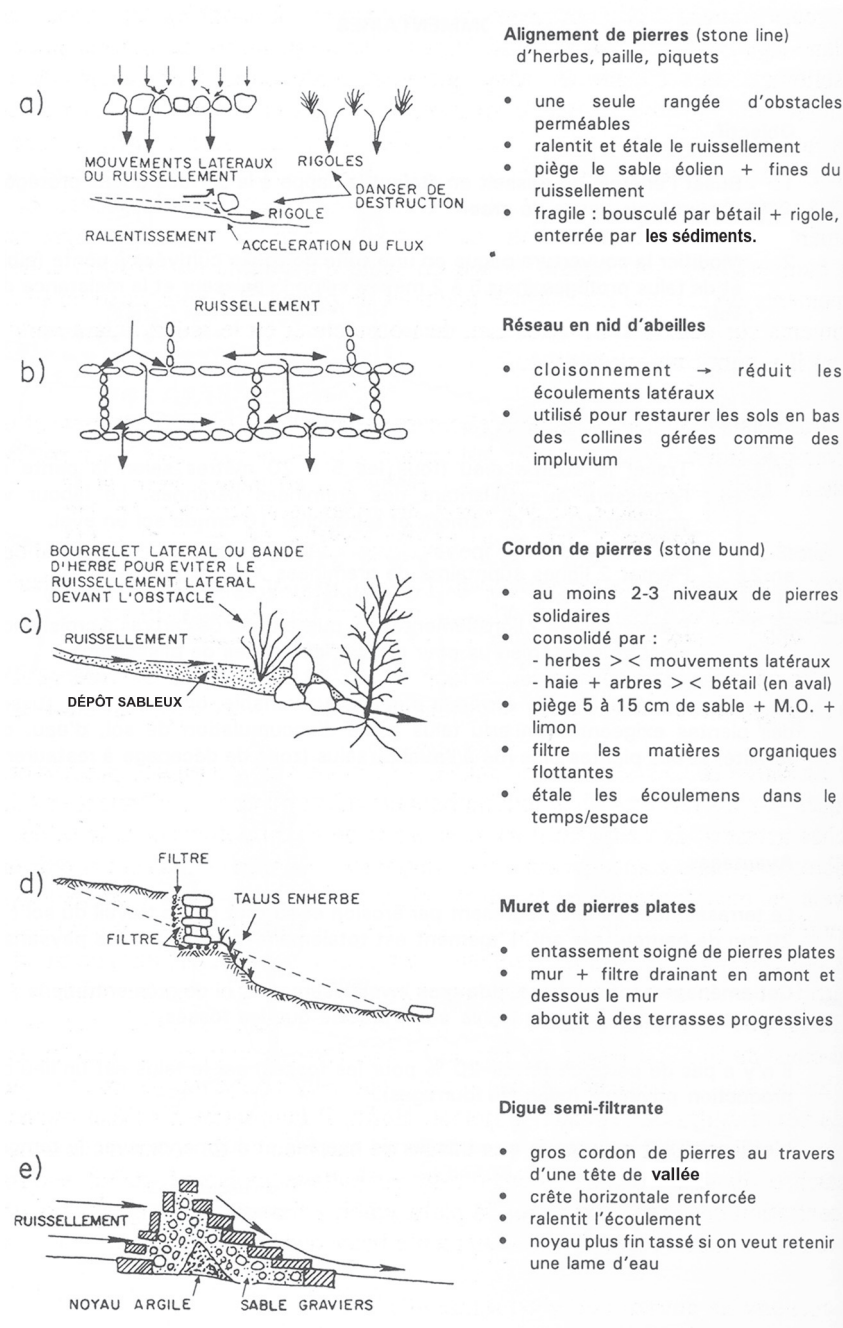


Figure 1
Exemples de micro-barrages perméables en milieu semi-aride.
Source : d'après ROOSE, 1994.

ruissellement localisé (effet venturi) capable de déplacer des gravillons. Ces alignements sont fragiles : d'un coup de sabots, les animaux qui divaguent peuvent déplacer une pierre et créer une brèche où l'eau accumulée s'en-gouffre (fig. 1a). De même, les piquets pourrissent et les touffes d'herbes évoluent au cours du temps : soumises au broutage répété en saison sèche, les bourgeons productifs s'écartent laissant un vide en leur centre par où les eaux s'échappent créant des mouvements latéraux dans la nappe de ruissellement accumulé en amont. La durée de vie de ces alignements est donc limitée si on néglige leur entretien, mais ils peuvent être au départ une véritable « ligne de défense » où s'accumulent les déchets de labour, des résidus de culture, des termitières et des pierres déterrées lors des labours : ils forment alors un véritable filtre biologiquement très actif (SPAAN, 2003). Pour lutter contre les mouvements latéraux de la nappe d'eau accumulée en amont, les Mossi ont développé un système de cloisons latérales donnant une structure en nid d'abeilles capable de piéger les MO qui circulent avec le ruissellement et de restaurer les sols en bas des collines (fig. 1b). On peut aussi colmater les brèches avec de grosses pierres, dès que les chemins d'eau se dessinent. Enfin, il est important de casser la croûte de battance ou de sédimentation qui bouche la surface des champs : un sarclo-buttage cloisonné réduit beaucoup les risques de concentration des eaux de ruissellement, de même qu'un filtre de paille posé à l'amont de la ligne de défense (ROOSE, 2004).

Les cordons de pierres en courbe de niveau

Ils sont composés de plusieurs niveaux de pierres disposées en courbe de niveau, généralement trois rangées sur les glacis de cette région (fig. 1c). Le premier étage formé de grosses pierres est « planté » dans le sol sur quelques centimètres et colmaté avec la terre de manière à accumuler en amont 10 à 15 cm de terre sableuse humifère filtrante pour améliorer la capacité de stockage de l'eau et renforcer l'horizon humifère. Le deuxième étage et le troisième rang à l'aval sont composés de pierres plus petites, ou de touffes d'herbes, qui répartissent les écoulements excédentaires, absorbent l'énergie cinétique du ruissellement et suppriment le risque de creusement des rigoles à l'aval lors des plus gros orages. Le travail du sol dans la bande cultivée (15 à 25 m de large perpendiculairement à la pente) et l'érosion en nappe et éolienne provoquent la formation rapide d'un talus qu'il faut stabiliser avec des herbes (*Andropogon* ou *Pennisetum*). L'aménagement d'un hectare en cordons de pierres (400 m linéaires) exige 30 à 60 jours de travail, plus le transport depuis la carrière (1 jour de camion) (DUGUÉ *et al.*, 1993 ; ROOSE, 1994). Ces cordons isohypses étalent le ruissellement en nappe et provoquent une amélioration de l'infiltration (baisse des crues et alimentation des nappes) et le dépôt des sables, des agrégats, des particules fines humifères et des flottants organiques. Le stockage d'eau est plus important que pour les alignements et les paysans considèrent qu'ils gardent en place la fertilité des sols et permettent une meilleure valorisation de la fumure.

Danger

Si la crête du cordon de pierres n'est pas strictement horizontale (cas des courbes isohypses lissées pour favoriser la culture attelée), la nappe se rassemble dans les points bas créant des rigoles évoluant en ravines qui drainent tout le versant. Si par contre on tente de suivre strictement les courbes de niveau (très difficile sur des pentes de 1 à 3 %), on aboutit à des largeurs de champs cultivés très variables (écart de dix mètres sur une pente de 2 % en cas de termitière), ce qui augmente le volume de pierres à déplacer et gêne beaucoup la mécanisation de la culture. Même dans ce cas, on observe la formation de chemins d'eau. En lissant les courbes de niveau, on peut traiter les chemins d'eau en renforçant ces zones par des grosses pierres, en aplanissant progressivement le champ par les techniques culturales, en améliorant la rugosité de la surface du sol (travail grossier, sarclages et buttage cloisonné), en semant des herbes de part et d'autre du cordon pour freiner le ruissellement, ou en cloisonnant le champ sur deux mètres avec des billons en terre (SERPANTIE et LAMACHÈRE, 1989). La dégradation des cordons de pierres par le bétail peut être réduite par la plantation d'herbes, d'arbustes et des arbres dans le cordon pour aboutir à un embocagement. Au cas où il manque de pierres ou de moyens de transport, on peut semer entre deux billons isohypses une bande d'herbes, de sorgho ou directement, une haie vive et des arbres pour obtenir le même effet (ROOSE, 1994). Dans les régions montagneuses, les paysans ramassent les pierres gênantes et les entassent à la limite des champs : si elles sont disposées en courbe de niveau, elles fonctionnent à la fois comme limite de champs et cordons de pierres. En Éthiopie et au Rwanda, les cordons de pierres peuvent atteindre plus d'un mètre de hauteur (ROOSE, 1992).

Les murettes en pierres sèches

Dans les collines où on peut disposer de bonnes pierres rectangulaires, on creuse une tranchée isohypse et on construit un mur en pierres sèches empilées soigneusement et calées par des cailloux, protégé en amont par un drain de gravillons pour dissiper la pression hydrostatique (ex. collines gréseuses autour de Bamako au Mali) (ROOSE, 1994). On aboutit rapidement à la formation de terrasses progressives par le rejet de la terre de la tranchée en amont, par érosion hydrique et surtout par érosion aratoire (labour versant vers l'aval). Pour réduire le déterrement du pied du mur lors des labours, il faut y planter des arbres fruitiers ou des fourrages permanents. Le coût de construction est beaucoup plus important que pour un cordon de pierres qui se monte progressivement avec les pierres de toutes tailles extraites lors du labour : en fonction de la pente et de la disponibilité en pierres, il faut compter 500 à plus de 1 000 jours de travail par hectare pour des murs de 1 mètre de haut sur des pentes moyennes de 20 %. Ce n'est donc rentable que si on dispose de moyens d'irrigation et d'un marché où écouler des produits valorisants.

Les digues semi-filtrantes

Il s'agit de gros cordons de pierres entassées sur un noyau de terre imperméable ($H = < 50$ cm) construits en courbe de niveau pour barrer une ravine ou une

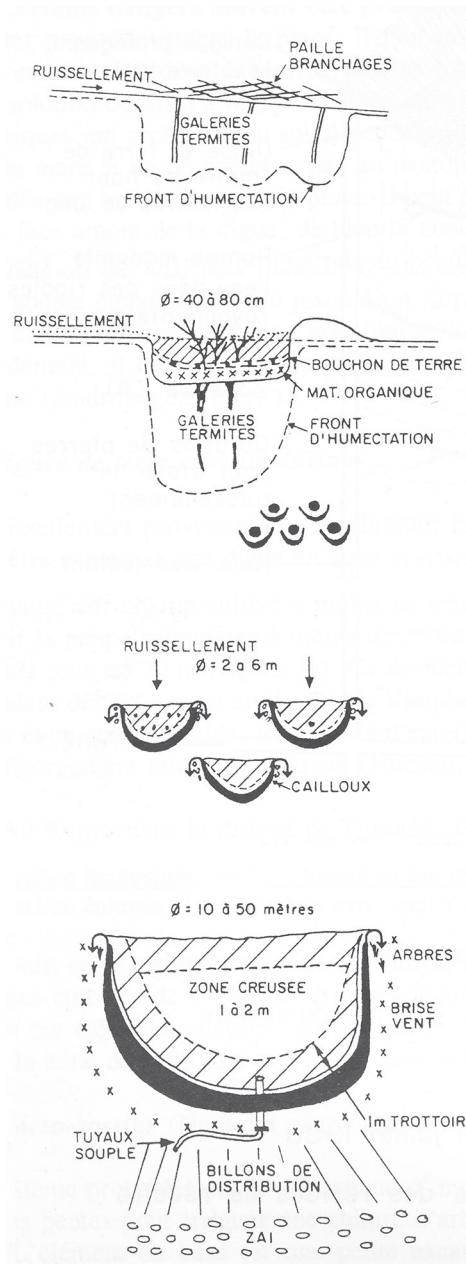
tête de vallée. Les plus gros ouvrages nécessitent l'utilisation de gabions. L'objectif premier de ce type d'ouvrage est de ralentir les crues dans les exutoires, tout en piégeant les sédiments enrichissant une petite surface qu'il sera ensuite possible de valoriser avec une culture hautement productive (riz, maïs, sorgho) même en année déficitaire (ROOSE, 1994). D'après ROCHETTE (p. 252), le rendement en sorgho est passé en moyenne de 0,6 t/ha en sec sur les versants non aménagés, à 1 t/ha sur bas-fonds non aménagés et 1,9 t/ha sur parcelles aménagées avec digue filtrante. Dans certaines situations, le stockage de quelques centaines de mètres cubes d'eau de ruissellement est possible tant que les sédiments ne sont pas arrivés en haut de l'ouvrage, ce qui permet l'abreuvement du bétail ou l'irrigation d'un petit jardin. Dans tous les cas, ces ouvrages ont un effet remarquable sur l'érosion ravinante et l'alimentation de la nappe.

Dangers

Si la crête de la digue n'est pas parfaitement horizontale ou la filtration est trop rapide au travers de la digue de grosses pierres, on risque d'observer le ruissellement emporter les pierres de crête ou creuser un renard sous la digue qui finira par former une brèche et une ravine. Pour l'éviter, il faut construire un filtre de gravier dans la cuvette de fondation et entre les grosses pierres du cœur de la digue. Normalement, les eaux retenues s'écoulent en 2-3 jours laissant un terrain détrempe en amont de la digue. Il arrive que le sorgho qui profite traditionnellement des fonds de vallée, souffre d'engorgement du sol, alors qu'il n'y a pas assez d'eau pour assurer le cycle complet du riz. Si on veut stocker de l'eau pour le bétail ou créer une rizière, il vaut mieux construire une digue imperméable en terre retenant suffisamment d'eau. Une diguette de 1 à 2 m de haut et de 100 à 200 m de long bâtie au travers d'un vallon exige 300 à 600 jours de travail et l'organisation d'un travail communautaire (15 hommes pendant 30 jours), alors que les bénéfices profitent à quelques familles (0,5 à 1 ha) : il faut donc trouver des compensations financières ou échanger des journées de travail avec les autres travailleurs. Le coût moyen pour une digue, qui consomme 100 à 500 m³ de pierres, varie de 1 000 à 2 000 €. Pour le même volume de pierres, on pourrait aménager en cordons 10 à 20 ha de versants appartenant à une vingtaine de familles, mais les cordons de pierres n'apportent pas la même sécurité de production en année déficitaire.

Les bandes enherbées isohypses

Ces bandes de 1 à 4 mètres de large réduisent le ruissellement de 40 à 60 % du témoin et l'érosion en nappe de 60 à 90 % grâce au ralentissement et l'étalement du ruissellement et au piégeage des MO, des agrégats et des sédiments sableux perméables. Elles orientent le travail du sol selon les courbes de niveau et produisent des herbes appréciées pour l'alimentation du bétail ou pour les toitures et divers produits artisanaux. Le risque de ces aménagements très simples, c'est la disparition de ces bandes enherbées lors des feux de brousse, de la mise en jachère et du fait du surpâturage, ainsi que le vieillissement des touffes d'herbe



Paillage (herbes + branchettes)

- les termites viennent manger les M.O.
 - ouvrent des galeries
 - favorisent la pénétration du ruissellement
 - répartissent les nutriments
- améliore l'infiltration et la fumure

Zai (pitting + fumier + termites)

- cuvette de 50-80 cm Ø, 10-15 cm en profondeur, terre en aval en croissant
 - capte le ruissellement sur bassin 3/1
- concentration eau + M.O. + nutriments
 - rendement > 800 kg/ha sur sol épuisé
- action ++ des termites sur infiltration. Grâce aux galeries l'eau infiltrée est à l'abri de l'évaporation directe

Demi-lunes (micro catchment 1/5 - 1/10)

- sur glasis limoneux, capture du ruiss. sur 10-20 m² pour irriguer :
 - des céréales
 - 1 ou 2 arbres
- protéger l'extrémité des diguettes par 3 cailloux pour éviter l'érosion lors du débordement

Boulis = mare creusée au bas d'un glasis à la limite du parcours

- digue construite avec la terre extraite progressivement du centre du croissant
- les sédiments fins apportés avec le ruissellement colmatent le fond de la mare
- 3 objectifs :
 - alimentation en eau du bétail (filtrer)
 - irrigation d'appoint d'un jardin précoce (1000 m²)
 - les sédiments fins peuvent être récupérés
 - briques ou terre organique

Figure 2
Collecte et stockage du ruissellement sur versant semi-aride.
Source : d'après ROOSE, 1994.

au bout de 4 à 10 ans (ROOSE et BERTRAND, 1971 ; ROOSE, 1994). L'expérience montre que les paysans réduisent progressivement la largeur des bandes enherbées lors des labours à moins d'un mètre, ce qui nous ramène aux « lignes de défense » où se mêlent herbes et pierres arrachées lors du sarclage, arbustes et arbres utiles formant un filtre pour ralentir le ruissellement et piéger les MO et les sédiments grossiers.

Les haies vives arbustives

Elles devraient être constituées de 2 à 3 lignes d'arbustes plantés en quinconce, de préférence des légumineuses renforcées par un filtre de paille ou des émondes de taille en amont. Elles fonctionnent comme des micro-barrages perméables très efficaces (SPAAN, 2003 ; DIATTA *et al.* ; 2012 ; BOLI et ROOSE 1998 ; KÖNIG, 2015 ; NDAYIZIGIYE, 2015 ; DUCHAUFOUR *et al.*, 1996). Au bout de 4 à 10 ans se forme un talus de 50 à plus de 100 cm de haut stabilisé par la litière et les racines. La plupart des paysans optent pour une seule ligne d'arbres et d'arbustes qu'ils ont déjà du mal à entretenir lorsqu'ils arrivent à la taille adulte (le seul outil efficace, le sécateur à deux mains, n'est pas disponible, car trop onéreux). On distingue premièrement, la haie défensive ou d'enclosure interdisant l'accès des animaux. Dans ce cas, les arbustes ne doivent pas être fourragers : des euphorbes très résistantes, mais toxiques et peu productives (ex. *Euphorbia balsamifera* ou *Jatropha curcas* produisant de l'huile utilisable comme carburant [PRESSOIR, 2012]), des acacias, et autres plantes à épines. Deuxièmement, la haie mixte combine les arbustes précédents (remplacer parfois par des fils barbelés) et des arbres fourragers de plus de 2 m – des légumineuses (*Leucaena*, *Calliandra*, *Acacia*, *Cassia*) – et peut fournir du fourrage de qualité en saison sèche ou du paillage après le semis des céréales et autres cultures.

Tous ces aménagements perméables, en ralentissant les eaux de ruissellement, prolongent le temps de concentration de la crue au niveau du drainage, réduisent les débits de pointe (donc le transport des sédiments) plus que le volume ruisselé total. Ils n'améliorent l'infiltration que localement en amont des micro-barrages, à moins d'améliorer la rugosité du sol par les techniques culturales (labour grossier, billonnage cloisonné, gaufrage, cuvettes) (LAMACHÈRE et SERPANTIÉ, 1990).

Les techniques favorisant le stockage de l'eau et des nutriments

Le paillage d'herbes ou de branchettes

En région semi-aride, la biomasse disponible en fin de saison de saison sèche est très recherchée par les éleveurs et leur bétail (droit de vaine pâture) et par les agriculteurs (matériau de construction et bois combustible et seule source

d'énergie). Il arrive cependant que, très localement, les résidus de culture soient très peu broutés sur place par le bétail (grosse tiges de sorgho, par exemple au sud de Ouagadougou) et partiellement piétinés à la surface du sol. Au début de la campagne suivante, le paysan rabat la végétation encore dressée et sème directement sous cette litière à peine écartée d'un coup de houe (*dabila*). Au Yatenga, on peut observer des paysans pauvres, dépourvus de bétail, ramasser les branchettes de diverses espèces arbustives (*Guiera senegalensis*, *Piliostigma thoningii* ou *reticulatum* et des légumineuses) et les étaler à la surface de petits champs pour « fumer leur lopin de terre » (ROOSE *et al.*, 1993 ; LAHMAR et YACOUBA, 2012). LAHMAR et YACOUBA (2012) ont décrit comment deux espèces dont les feuilles sont peu appréciées, *Guiera senegalensis* et *Piliostigma reticulatum*, sont gérées par les agriculteurs pour fournir un paillage localisé et du bois de feu, une fois les feuilles libérées. Ces branchettes ne sont pas hachées, ni éclatées comme le BRF : elles attirent les termites qui vont les consommer, ouvrir des galeries dans la croûte du sol et enfouir des MO susceptibles d'être restituées progressivement aux cultures. Cette litière absorbe l'énergie de la battance des pluies et du ruissellement, améliore et stabilise l'infiltration, piège des sédiments éoliens et hydriques et fournit pas mal de carbone et de nutriments au sol. Au Niger, certains arbustes sont traités comme des micro-jachères qui poussent en saison sèche, puis rasés au moment de la plantation, les branchettes étant étalées sur le terrain semé en céréale (mil). Trois semaines plus tard, lors du sarclage, les feuilles se sont détachées des tiges séchées qui sont progressivement récupérées pour la cuisine. On observe qu'autour de ces buissons, la croissance des cultures est meilleure qu'à plus de 3 mètres des touffes (LOUPPE, 1991 ; WEZEL et BÖCKER, 1999). Plus rarement, certains paysans peuvent récolter des pailles d'herbes de brousse non consommées par le bétail et l'épandre sur de petits espaces « séchants » dont ils souhaitent améliorer la fertilité. Notons que dans tous les cas observés en région soudano-sahélienne, il s'agit d'une litière peu épaisse (1 à 3 cm) qui tente de couvrir et nourrir le sol en début de saison des pluies plutôt que les paillis épais (5 à 15 cm) observés au Rwanda et Burundi sous caféiers pour maintenir l'évaporation réduite en saison sèche. De plus en Afrique soudano-sahélienne, il y a une forte concurrence entre les différents usages de ces biomasses (fourrages, matériaux de construction, combustible, couverture du sol, etc.) (voir Dugué *et al.* chap. 30 dans cet ouvrage).

Les cuvettes (Zaï = *tassa* = *towalen*, *pitting*, *microcatchment*)

Pour restaurer durablement la productivité des cultures dans ces zones semi-arides, il ne suffit pas de freiner localement la vitesse du ruissellement et d'étaler en nappe le ruissellement : il faut encore concentrer le peu d'eau et de nutriments disponibles au pied des touffes de céréales.

Au Yatenga (nord-ouest du Burkina Faso), le zaï est une technique traditionnelle de récupération des terres dégradées (zipellé, terres encroûtées, tassées, blanchies par la battance, véritables déserts, alors qu'il pleut 400 à 800 mm ; ganagani,



a : Djengo = gauffrage du sol sableux des champs de case avec enfouissement de fumier.
Arbre à palabre devant la concession, habitat dispersé Mossi, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

b : Zipelle = sol dégradé par la culture sur le glacis : restauration comportant des cordons de pierres, des apports de poudrette (1 à 3 t/halan) et les cuvettes de zai.

Gourga, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

sol similaire au Niger) (ROOSE *et al.*, 1993). Aujourd'hui, tous les sols de la région sont concernés à l'exception des dunes et des vertisols : les sols gravillonnaires des sommets de glacis, les sols ferrugineux limono-sableux de mi-pente et les sols alluvionnaires de bas de pente (MARCHALL, 1986). On peut aussi observer leur réussite au pays dogon (towalen au Mali), au Niger (tassa ou taksa en haoussa dans la vallée de Keita), au Tchad et leur échec dans la zone soudanienne plus humide du Nord-Cameroun (WRIGHT, 1982 ; ROOSE *et al.*, 1993 ; BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO, 2004 ; DROUX, 2008).

D'après BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO (2004), cette technique traditionnelle trouverait ses origines dans l'agriculture nabatéenne du Proche-Orient et aurait été introduite au Sahel par les pèlerins musulmans. Les Mossi se seraient inspirés de la pratique du towalen développée sur le plateau dogon. Elle est décrite en détail dans la figure 3 (ROOSE *et al.*, 1993). Le zaï consiste à préparer très tôt, en début de saison sèche, une terre dégradée, encroûtée et durcie en creusant à la pioche tous les 80 à 120 cm en quinconce des cuvettes de 20 à 40 cm de diamètre (en fonction de l'aridité), de 10 à 20 cm de profondeur, en rejetant la terre vers l'aval en croissant pour mieux stocker le ruissellement. La surface non travaillée du champ, qui sert d'impluvium, représente 5 à 10 fois la surface travaillée (WRIGHT, 1982). Pendant la saison sèche, ces micro-bassins piègent des sables, des limons et des matières organiques emportés par le vent du désert (harmattan). Avant les premières pluies, les paysans y enfouissent une ou deux poignées de poudrette (soit 1 à 3 t/ha de déjections animales des parcs exposées au soleil et réduites en poudre par le piétinement du bétail), du fumier, du compost ou, à défaut, des cendres mélangées à des pailles ou des branchettes et des feuilles. Les termites (*Trinervitermes* ou d'autres), attirés par les MO, creusent des galeries au fond des cuvettes et les transforment en entonnoirs créant ainsi des poches humides en profondeur, à l'abri de l'évaporation rapide : ces réserves d'eau permettent aux jeunes cultures de tenir trois semaines de sécheresse (ROOSE *et al.*, 1993). Après un orage, la famille sème dans chaque poquet une douzaine de graines de sorgho sur les terres lourdes ou une vingtaine de graines de mil sur les sols sableux ou gravillonnaires : en levant ensemble, ces petites graines soulèvent la croûte de sédimentation qui se forme au fond des cuvettes lors des premiers orages. Trois semaines plus tard ont lieu le démaillage à 3–4 plants vigoureux et le sarclage des cuvettes (surface réduite à 20 % du champ). S'il en a les moyens, le paysan complète la fumure organique par un apport minéral localisé au poquet (N et surtout P) qui sera largement amorti par l'augmentation de la production en grains (KABORÉ, 1995, 2005 ; ZOUGMORE *et al.*, 2008). Ces techniques de préparation du sol dégradé permettent de produire dès la première année de 0,5 à 1,6 t/ha de grains et de 2 à 4 t/ha de pailles appréciées pour le bétail, l'artisanat et divers usages ménagers. L'année suivante, soit les fermiers creusent de nouvelles cuvettes entre les précédentes et ajoutent des MO, soit s'ils manquent de fumier, ils arrachent à la houe la souche de sorgho et la posent sur la surface encroûtée où elle sera consommée par les termites. Ensuite, ils grattent le fond des anciennes cuvettes et y sèment directement une céréale ou le niébé (haricot noir) (SOMÉ *et al.*, 2004). Il semble que

Décembre à avril

- Creusement tous les 80 cm d'une cuvette Ø = 40 cm, H = 15 cm terre posée en croissant en aval.
- L'Harmattan apporte des sables et des matières organiques.

Avril à juin

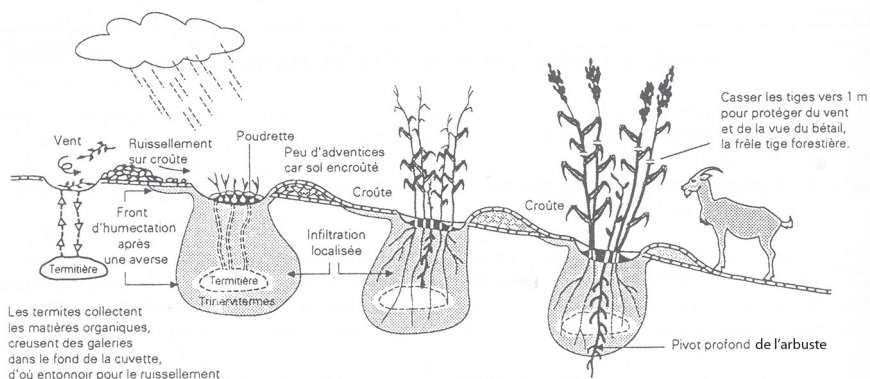
- Après la première pluie, apport de 2 poignées de poudrette (= 3 t / ha).
- Les termites y creusent des galeries enrobées d'excréments.
- Semis en poquet à la deuxième pluie.
- Eau infiltrée, stockée en profondeur à l'abri de l'évaporation directe.

Juin-juillet

- Démarrage de la saison des pluies.
- Levée précoce.
- Enracinement profond.
- Sarclage limité aux poquets.
- Germination de graines forestières.
- Concentration : de l'eau **et** des nutriments.

Novembre

- Récolte : des panicules et du fourrage.
- Coupe des tiges vers 1 m : cache les tiges forestières de la vue du bétail, ralentit le vent desséchant et l'érosion éolienne.



- Zai (en Moore) signifie : se hâter pour creuser en saison sèche le sol tassé et encroûté.
- Il permet de récupérer des terres abandonnées et de produire environ 800 kg / ha de grain dès la première année et d'entretenir la fertilité du sol sur plus de 30 ans.
- Il concentre l'eau et la fertilité sous le poquet et permet d'associer à la culture des arbres fourragers bien adaptés (agroforesterie).
- Limites : la date de commencement des travaux est fixée par le chef de terre du village... après les fêtes, quelque fois trop tard.
le Zai exige 300 heures de travail très dur soit environ 3 mois pour un homme pour restaurer 1 ha.
le Zai demande 2 à 3 tonnes de matières organiques et les charettes pour transporter la poudrette et le compost.
pour réussir il faut entourer le champ à restaurer d'un cordon de pierres pour maîtriser le ruissellement.
- Améliorations : soussolage croisé à 1 dent jusqu'à 12 - 18 cm, après la récolte, tous les 80 cm, (11 heures avec des boeufs bien nourris), creuser ensuite le Zai en 150 heures.
compléter la fumure organique par N et P qui manquent dans la poudrette exposée au soleil.
introduire d'autres espèces forestières élevées en pépinière (3 mois de gagné).

Figure 3
Le zai : méthode traditionnelle de restauration des sols.
Source : d'après ROOSE, 1994.

ce système de production intensif n'accélère pas la dégradation de ces terres pauvres. Au contraire, au bout de cinq ans, toute la surface a été remuée par la houe et les termites. D'après les paysans de Gourga (Yatenga), ce système présente l'avantage de conserver la MO et la fumure dans la cuvette alors que dans les champs labourés voisins, le ruissellement les emporte en grande partie dès les premiers gros orages. De plus, le développement de jeunes arbres est favorisé par cette technique, car les fèces des animaux contiennent souvent des graines de ligneux. Mais sur des sols sableux du Niger, BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO (2004) et FATONDI *et al.* (2009) ont mis en évidence des pertes d'eau drainant sous les cuvettes, ce qui peut entraîner des fuites d'azote et des pertes de rendement du mil.

BOLI et ROOSE (1998) ont aussi constaté qu'en zone soudanienne, le rendement en maïs fut réduit sous zaï par lessivage de l'azote durant les semaines les plus pluvieuses au Nord-Cameroun (Mbissiri).

Effets sur le sol

Après deux années d'application continue du zaï sur un sol ferrugineux peu profond et un sol brun eutrophe, ROOSE *et al.* (1993) n'ont pas constaté de changement significatif de la fertilité des sols, à part l'augmentation des particules fines qui peut être attribuée à l'activité des termites. Par contre quelques années plus tard, FATONDI *et al.* (2009) observent des modifications du pH et du complexe absorbant du sol sableux, mais pas dans le sol argileux. ROOSE *et al.* (1993) concluent que la réhabilitation de la couverture végétale et de la productivité des cultures serait plus rapide que la modification des propriétés du sol.

Le zaï semble une technique appropriée pour réduire les effets de sécheresse liés à l'espacement des pluies. ROOSE *et al.* (1993) suggèrent que grâce au stockage de l'eau en profondeur, le zaï tamponne l'effet d'un épisode déficitaire de 2 à 3 semaines si la capacité en eau du sol est suffisante. Sur des sols sableux ou peu épais sur cuirasse, le zaï serait moins efficace, à moins de forts apports de matières organiques.

Effets sur les cultures et la biodiversité

Les cuvettes seules et leur effet sur l'alimentation en eau des cultures ne suffisent pas à relever suffisamment la production en céréale (ROOSE *et al.*, 1993 ; KABORÉ, 1995 ; FATONDI *et al.*, 2009). L'apport de matières organiques est primordial pour relever la capacité de stockage en eau et en nutriments, ainsi que les activités biologiques. En Afrique cependant, le fumier est généralement limité en quantité (une exploitation produit rarement plus de 7 à 8 m³ de fumier composté) et en qualité (il s'agit généralement de déjections animales exposées au soleil et réduites en poudre par le piétinement des animaux au parc de nuit). De plus les sols étant carencés en azote et surtout en phosphore assimilable, les fourrages et les fumiers le seront aussi. Il est donc recommandé d'apporter un complément minéral aux cultures (urée, phosphates de chaux) qui permettent de valoriser au

mieux ces apports localisés en eau (ROOSE, 1994). Les apports minéraux utilisés seuls sont mal valorisés surtout dans les sols acides à toxicité aluminique ou à faible capacité de rétention en eau et en nutriments (BOUZOU-MOUSSA et DAN LAMSO, 2004). ZOUGMORE *et al.* (2003) arrivent aux mêmes conclusions sur des demi-lunes et des zaï. La levée de la contrainte hydrique dans les sols ferrugineux tropicaux dévoile l'autre contrainte majeure de l'acidité et de la déficience en nutriments dans ces sols tropicaux. On observe sur les parcelles traitées en zaï que les cuvettes piègent les graines transportées par le vent, par le ruissellement et par les paysans (fumier). ROOSE *et al.* (1999) ont compté sur les tas de poudrette les graines de 22 espèces d'herbacées et une douzaine de légumineuses arbustives consommées par le bétail.

La technique du zaï a souvent été décrite comme une simple technique culturale comparable au billonnage cloisonné. En réalité, c'est une technique complexe faisant appel à de nombreux processus : capture des eaux de ruissellement sur des zones encroûtées (rôle des micro-barrages et des cuvettes), concentration de l'eau disponible et des ressources en MO et en nutriments, capture des sédiments véhiculés par l'eau et le vent, travail du sol localisé, infiltration et stockage de l'eau en profondeur, alimentation locale des nappes phréatiques, enracinement profond, renouvellement des nutriments par les pluies et le ruissellement, stimulation ou optimisation de la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses (arbustes et niébé associés aux céréales), remontées de particules fines par les termites et enfouissement des MO grossières, réduction du ruissellement et des pertes de suspensions riches en MO et en nutriments, tout ceci concourant à la réhabilitation d'un système agro-sylvo-pastoral. Cette technique permet d'accroître la surface cultivée par récupération de sols dégradés et optimise l'investissement en intrants et en travail. Il permet de réinvestir dans des terres protégées du ruissellement, mais exige des cultures intensives et des arbres pour réduire les risques de pertes par drainage (DIALLO *et al.*, 2008).

Même en l'absence de termites, la technique du zaï améliore la décomposition des matières organiques, la libération des nutriments et l'efficacité des engrais (FATONDI *et al.*, 2009). Il reste cependant des problèmes de synchronisation entre la demande de nutriments des cultures et leur libération par la minéralisation des MO. Dans les sols sableux (au Cameroun comme au Niger), on observe parfois des pertes d'azote par drainage profond, lorsque l'enracinement des plantes n'est pas encore assez développé pour absorber l'azote minéral libéré par les engrais minéraux ou le fumier bien décomposé (BOLI et ROOSE, 1998 au Nord-Cameroun ; FATONDI *et al.*, 2009 au Niger). De même, ROOSE *et al.* (1993) constatent que sur des sols sableux ou peu épais sur cuirasse, le zaï est moins efficace, à moins de forts apports de matières organiques. De plus, ils ont montré que le zaï n'est pas approprié aux zones sahéliennes recevant moins de 300 mm (déficit hydrique trop fréquent), ni aux zones soudaniennes recevant plus de 800 mm de pluies, car le drainage de l'excès d'eau capté par les cuvettes entraîne alors le lessivage de l'azote et des bases (ex. de Mbissiri au Nord-Cameroun). Le zaï ne doit donc pas être considéré comme une technique pour tous les sols dégradés de l'ensemble des zones de savane (ROOSE *et al.*, 1993).

Une diversité de pratiques

La technique du zaï décrite ici (fig. 3) connaît de nombreuses variantes : presque chaque paysan a sa propre recette adaptée à l'environnement de son exploitation.

Le zaï forestier⁸

Certains paysans préservent durant le sarclage les jeunes pousses d'arbustes fourragers légumineuses tous les cinq poquets de sorgho. Pour protéger ces jeunes arbustes des dents des chèvres en saison sèche, l'agriculteur coupe les tiges de sorgho au-dessus du niveau des yeux de ce prédateur pour qu'il n'aperçoive pas les frêles tiges des arbustes au milieu des milliers de tiges de sorgho. Ces plants forestiers prospèrent rapidement au milieu des céréales, recolonisent sans frais ces zones désertifiées et participent au maintien de la fertilité des sols. On pourrait croire que l'exportation de 1 à 1,5 t/ha de graines de céréales et de 2 à 4 t/ha/an de paille accélérerait la dégradation de la fertilité du sol. En réalité, l'enquête auprès des paysans de Gourga au Yatenga montre qu'au bout de 35 ans d'exploitation, des champs aménagés en zaï et régulièrement entretenus continuent à produire plus que la moyenne régionale grâce aux apports de poudrette, aux remontées par les termites et les arbustes, aux apports par le ruissellement, les pluies et le vent.

Le zaï mécanisé

Pour réduire les temps de travaux (300 heures/ha à la houe et au pic), ROOSE *et al.* (1993) ont testé l'usage d'une dent tractée par un bœuf pour fendre le sol en courbe de niveau tous les mètres et en oblique pour créer un damier en losange. Aux intersections, on creuse manuellement la cuvette, ce qui permet de gagner 200 heures de travail. BARRO *et al.* (2005) ont validé en milieu paysan la mécanisation du zaï par la traction asine d'une dent (IR 12) portée sur un porte outil (Kassine) : réduction des temps de travaux (40 heures/ha), augmentation des rendements de 400 kg en culture manuelle à 800 kg/ha/an en culture à traction asine et 1 200 kg par adjonction d'une minidose d'engrais NPK, augmentation de production des pailles de 5,5 t/ha en zaï manuel à 8,5 t/ha/an en zaï mécanisé avec complément minéraux.

Le djengo

Il s'agit aussi de cuvettes (plus petites et plus denses que pour le zaï), mais creusées au début de la saison des pluies en sol humide (plus tard que le zaï) sur des sols sableux. Le sol étant moins compact, le travail est réalisé à l'aide d'une houe à long manche (appelée djengo) au lieu d'une houe courte à manche recourbé (boamboara) qui oblige à travailler « courbé en deux ». L'investissement en travail est bien moindre que pour le zaï (105 heures, soit 21 HJ/ha). Les cuvettes sont creusées sur un sol nu houé manuellement ou sur un sol déjà

8. ROOSE *et al.*, 1993, 1999.

couvert de jeunes adventices : leur densité atteint 40 000/ha, leur diamètre 22 à 27 cm et leur profondeur 8 cm et l'apport de MO est d'environ 7 à 8 t/ha (50 % d'humidité). Le temps de l'aménagement varie de 15 à 25 jours/ha et le rendement (0,93 t de grain et 2,3 t/ha de paille) est à peine plus élevé qu'après un semis direct (0,9 t de grain et 1,8 t/ha de paille) (HIEN *et al.*, 2012).

Les demi-lunes

Il s'agit de capter le ruissellement à l'intérieur de diguettes en terre de 30 à 50 cm de hauteur en forme de croissant de lune de 2 à 6 m de diamètre, alignées le long des courbes de niveau et implantées en quinconce tous les 4 à 10 m. À l'intérieur des demi-lunes sont semées des céréales (mil ou sorgho), ou plantés des arbres adaptés aux zones semi-arides (200 à 500 mm). Comme pour le zaï, la capture du ruissellement sur 10 à 20 m² permet de doubler l'eau infiltrée et de résister à des périodes de sécheresse de 2 ou 3 semaines. Cependant, en période de fortes pluies, il y a un risque d'engorgement en particulier pour le mil et les légumineuses associées. Par ailleurs, la maîtrise de l'alimentation hydrique fait apparaître la seconde contrainte, l'acidification du sol et les carences en nutriments. Seul un apport complémentaire de fumier, de phosphate calcique naturel broyé et d'engrais minéraux permet d'améliorer le pH, le taux de MO, d'azote, de phosphore assimilable et les bases de l'horizon superficiel du sol, ce qui entraîne l'augmentation significative des rendements en grain (1,6 t/ha) et pailles (4,2 t/ha), même sur sol ferrugineux gravillonnaire superficiel (Desbos *in* ROCHETTE, 1989) (ZOGMORE *et al.*, 2003 ; 2004).

Les cuvettes fruitières

C'est un cas particulier de demi-lunes de petite taille (2-4 m de diamètre) adaptées à la plantation d'arbres fruitiers et à leur besoin en eau. Elles drainent quelquefois le ruissellement qui se développe sur les pistes, dans les zones habitées ou au bas de versants rocheux. Généralement, ces cuvettes reçoivent chaque année du fumier bien décomposé et des compléments minéraux favorisant la production de fruits et de feuilles fourragères.

Les mares

Cette technique traditionnelle de stockage de l'eau de ruissellement (fig. 2) repose comme pour le zaï sur le captage du ruissellement sur les glacis (DUGUÉ, 1986 ; ROOSE, 1994). Les mares (boulis en mooré) sont creusées dans le glacis à la limite du parcours (glacis gravillonnaire) et du bloc de champs (glacis sablo-limoneux). Certains paysans mossi ont creusé progressivement des trous d'eau qu'ils agrandissent en bassin/mare de 1 à 2 m de profondeur, et avec la terre extraite, ils ont construit une digue en forme de croissant s'étirant sur 5 à 15 m au travers du glacis. Dès les premières pluies, le ruissellement provenant des parcours sur les sommets des collines accumule plusieurs dizaines de mètres cubes d'eau pour alimenter le bétail (qui perdra moins de poids en fin de saison sèche à se déplacer jusqu'au point d'eau dans les bas-fonds ou vers les retenues collinaires). Ces



a : structure de capture et redistribution du ruissellement sur un versant cultivé : Gourga, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRDI/É. Roose

b : fosse à compost irriguée par le ruissellement du champ : Boukere, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRDI/É. Roose

boulis peuvent aussi irriguer un petit jardin à la raie ou au zaï qui, bien fumé, pourra produire deux cultures, du maïs précoce et des pastèques tardives. Cet aménagement améliore surtout la sécurité alimentaire au moment de la soudure. Il exige beaucoup de travail, mais peut s'exécuter progressivement grâce à l'entraide entre voisins. Des améliorations des boulis traditionnels sont envisageables soit pour réduire le temps de travail, soit pour augmenter le volume d'eau stocké. On peut réduire le travail de creusage en plaçant le bouli en tête de ravine, là où



a : « Bouli », mare creusée manuellement pour capter le ruissellement issu des collines, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

b : jardin irrigué en aval d'un bouli : Sabouna, Yatenga, Burkina Fasso.

© IRD/É. Roose

se rassemble beaucoup de ruissellement avant que les transports solides soient trop importants. Cette option permet du même coup de stabiliser la ravine en réduisant ses débits de pointe (ROOSE, 1994). Pour éviter que l'érosion comble cette mare, il faut aménager le glacis pour retenir les sédiments sans trop réduire le volume ruisselé (cordons de pierres). Une autre solution consiste à récupérer les sédiments frais dès que les eaux baissent, pour en mouler des briques de terre crue qui sècheront au soleil. Pour éviter les maladies contagieuses du bétail, il ne faut pas permettre aux animaux de pénétrer dans la mare et y déposer leurs déjections : il faut aménager en aval un abreuvoir et un filtre (fût de 200 litres rempli de lits alternés de sable et de charbon de bois). Pour accroître le volume d'eau stockée au cours d'une année, il convient à la fois d'augmenter la capacité du bassin (recours à un engin de travaux publics ou simplement un tracteur avec une sous-soleuse subventionnée par un projet) et son étanchéité. Le ministère de l'Agriculture du Burkina Faso a lancé en 2012 un programme de construction de bassins pour l'irrigation de complément du maïs de saison des pluies.

Les limites de ces techniques

Aucune de ces techniques n'apporte de solution miracle aux problèmes posés par la sécheresse, par les carences en nutriments et par les disettes/famines dans la zone soudano-sahélienne, mais leur association permet d'améliorer considérablement la situation des populations.

Du point de vue hydrique

Les micro-barrages perméables (cordons, haies, bandes enherbées, etc.) améliorent localement l'infiltration, mais surtout réduisent la vitesse du ruissellement et sa charge solide, donc l'érosion. Par contre, les cuvettes captent une bonne partie du ruissellement ($20\,000 \text{ cuvettes/ha} \times 0,4 \times 0,3 \times 0,2 = 480 \text{ m}^3/\text{ha} = 48 \text{ mm}$) qui mouille une tache profonde de 1 mètre, ce qui permet aux cultures semées précocement de résister pendant 3 semaines à une forte ETP. Sur les sols superficiels sur cuirasse, gravillonnaires ou sableux, une partie de cette eau s'infiltré en profondeur et nourrit la nappe : ceci a été observé dans les puits de nombreux villages mossi. En réalité, l'association des deux approches permet de réduire les risques d'inondation lors des plus gros orages. « Mais ni les cordons, ni le zaï ne font pleuvoir ! » conclut un paysan plein de sagesse. Ces techniques atténuent les effets des périodes déficitaires, mais ne résolvent pas tous les problèmes posés par la fréquence des longues périodes sèches. ROOSE *et al.* (1993) ont démontré qu'au-delà de 800 mm de pluie annuelle moyenne, le zaï entraîne une augmentation du drainage et le lessivage des nutriments solubles, en particulier l'azote. En dessous de 300 mm/an, la durée du cycle de croissance des cultures est supérieure

à la durée de la saison des pluies, donc pas de production de graine un an sur 2 ou 3. Il y a quand même une large bande soudano-sahélienne depuis le Sénégal jusqu'en Éthiopie et même à Madagascar où cette technique traditionnelle améliorée pourrait augmenter la production de biomasse.

Du point de vue de la restauration de la productivité des sols

Une fois réduits les déficits hydriques, apparaissent les carences en nutriments et en MO : les rendements en pailles et en grains sont à peine améliorés. Toutes les expérimentations montrent que les apports en fumier, compost (et autre biomasses à faible C/N) sont une priorité pour améliorer la stabilité structurale du sol et la disponibilité en eau et en nutriments des cultures. Par contre, les enfouissements de paille et litière grossière entraînent une « faim d'azote ». Cependant, les modélisations et les expérimentations ont montré qu'à l'échelle d'une exploitation agricole, la biomasse disponible, d'autant plus faible que le climat est aride, ne couvre que 10 à 30 % des besoins en nutriments des surfaces cultivées. Pour valoriser les apports d'eau et de fumier, il faut donc investir raisonnablement dans des compléments minéraux, en particulier N et P. L'azote peut être fourni par des cultures de légumineuses fourragères ou alimentaires, mais l'apport de phosphate de chaux reste incontournable pour optimiser la production (ROOSE, 1994 ; KABORÉ, 1995 ; ZOUGMORE *et al.*, 2004 ; MANDO *et al.*, 1999 ; ZOUGMORE *et al.*, 2008). Là où les cuvettes augmentent la production de 1 à 4 q/ha, le fumier rapporte 6 à 10 q/ha et les compléments minéraux 12 à 16 q/ha, ce qui permet de nourrir 5 à 6 personnes au maximum, mais ne dégage pas de compléments pour nourrir les populations urbanisées, constituer des stocks pour financer les frais de scolarité, de santé, et entretenir des relations sociales. L'amélioration localisée de la disponibilité en eau et nutriments encourage la plantation/régénération d'arbres (par les graines ou les racines) bien choisis pour recycler les nutriments entraînés par les eaux de drainage sous les racines des cultures annuelles (parcs et haies vives) : elle permet le retour à un système agro-sylvo-pastoral plus durable. Sur les sols acides (sableux, ferrugineux tropicaux, ferrallitiques lessivés), la baisse du pH est préoccupante dès lors qu'on dépasse la limite inférieure de pH < 4.8 où l'aluminium échangeable devient toxique et s'oppose à la réalisation d'une production acceptable. Là aussi l'apport de fumier ou, à défaut, de biomasse disponible (branchettes et feuillages arbustifs en paillage, litière, mulch de résidus de culture), de cendres du foyer ou de chaux ou dolomie broyées, peuvent maintenir le pH au-dessus du seuil dangereux. Sur des sols trop riches en calcaire libre où le phosphore et divers oligoéléments risquent de devenir indisponibles pour les cultures, le paillage augmente le lessivage des bases, mais aussi de l'azote du sol.

Du point de vue économique

Le coût des aménagements CES et du zaï est énorme en jours de travail (ROOSE, 1994 ; DE GRAAFF et STROOSNIJDER, 1995 ; BODNAR, 2005). Par exemple pour le zaï, il faut compter 60 jours de rude labeur, rien que pour creuser les cuvettes,

auxquels il faut encore ajouter le temps pour fabriquer et transporter le fumier (3 à 7 t/ha selon les auteurs) et la collecte et le transport des matériaux (pierres, herbes, arbres) et la construction des lignes de défense (400 à 1 000 m/ha en fonction de la pente). L'installation de cordons de pierres ou de bandes enherbées ne s'est pas avérée rentable, bien qu'elle assure une légère augmentation de production de sorgho (SERPANTIÉ et LAMACHÈRE, 1989). Par contre, les bénéfices furent substantiels sur les parcelles de Saria (Burkina Faso) lorsqu'on a ajouté du compost, de l'azote et des phosphates de chaux aux champs aménagés avec des cordons de pierres ou des bandes enherbées (ZOUGMORE *et al.*, 2008). La mécanisation des travaux et la location de charrettes peuvent réduire de moitié les temps de travaux (ROOSE *et al.*, 1993 ; BARRO *et al.*, 2005). Leur diffusion rapide exige une formation, des démonstrations effectuées chez les paysans avec l'aide des ONG ou des services de diffusion et temporairement, des visites ou échanges avec des paysans « innovateurs », des encouragements économiques (location de camions, vente de charrettes, nourriture, pépinières et petit outillage) selon la motivation et la pauvreté des candidats (ROCHETTE, 1989 ; CRITCHLEY *et al.*, 1992).

Du point de vue de la biodiversité

La capture des graines diverses qui circulent dans ces paysages avec le vent et le ruissellement en amont des lignes de défense ou dans les cuvettes et l'apport en surface de biomasse ou de poudrette créent les circonstances favorables au développement d'une vingtaine d'espèces d'adventices et d'une douzaine d'arbustes, légumineuses ou non (ROOSE *et al.*, 1999). Une gestion intelligente de cette biodiversité permet de restaurer en quelques années de gestion sélective un système agro-sylvo-pastoral pour exploiter au mieux les ressources locales. L'apport de fumier ou de compost permet aussi de réintroduire des activités microbiennes indispensables pour minéraliser la biomasse et restituer des nutriments minéraux assimilables par les cultures. Les litières et MO fermentées amènent aussi le développement des vers de terre et autres « ingénieurs du sol » qui améliorent ce recyclage des nutriments, la stabilité de la structure et autres propriétés physiques du sol (ROOSE, 1976 ; BLANCHART et JOUQUET, 2013, chap. 23).

Conclusions

D'après ROOSE *et al.* (2011), les sols dégradés étant instables à l'eau et pauvres en nutriments et en MO, la restauration de leur productivité passe par la mise en œuvre de techniques complexes comprenant : 1) la capture et la gestion des eaux de ruissellement en fonction de l'aridité du milieu, 2) le travail du sol

localisé et stabilisé par des MO, 3) la revitalisation biologique de l'horizon superficiel (fumier/compost), 4) la nutrition équilibrée des plantes en fonction de leurs besoins, 5) la correction de l'acidité du sol (pH entre 5 et 7) : apport de MO et phosphate, 6) le choix de cultures associées à des légumineuses et à des arbres non envahissants.

Ces six règles permettent de restaurer rapidement et durablement une production végétale supérieure à celle des terres environnantes fraîchement défrichées. Mais cela a un coût : beaucoup de travail, l'association de l'élevage et des arbres pour augmenter la production de biomasse du terroir (donc des coûts supplémentaires en travail pour la plantation et le gardiennage permanent du bétail), l'amélioration de la production de fumier, l'investissement raisonné dans des compléments minéraux, en particulier des phosphates de chaux (ROOSE *et al.*, 2011).

La fumure organique associée à des compléments minéraux donne les meilleures productions en fonction des pluies disponibles : elles sont souvent plus rentables que les aménagements de CES, mais ceux-ci sont indispensables pour garder au champ l'eau, les sols et la fumure investie.

L'amélioration de ces techniques traditionnelles passe par l'augmentation de la production de biomasse et de fumier, la couverture du sol, l'association réelle entre les cultures, les légumineuses, l'élevage et les arbres, l'utilisation raisonnée de compléments minéraux et l'amélioration des techniques culturales (semis en ligne et sarclage mécanisé) et le développement de production fourragère.

Les principales difficultés rencontrées concernent la gestion des déplacements des troupeaux des parcours à l'abreuvoir ou au parc de nuit, la régénération des parcours et le respect des plantations d'arbres, la faiblesse des moyens matériels et financiers des exploitations, le respect des zones mises en défens et l'entretien des aménagements physiques et biologiques. L'aménagement du terroir par quartiers (versants exploités par quelques dizaines de paysans) permet d'optimiser les aménagements réalisés sur les segments fonctionnels du paysage : sommets secs, versants à fort ruissellement, excès d'eau dans les vallons et les bas-fonds. Aux techniques encore perfectibles, il faut aussi adjoindre des innovations organisationnelles et politiques d'appuis aux paysans pour qu'ils puissent les mettre en œuvre à grande échelle.

Bibliographie

BARRO A., ZOUGMORE R., TAONDA S., 2005 – Mécanisation de la technique du zaï en zone semi-aride. *Cahiers Agricultures*, 14 : 549-559.

BILLAZ R., 2012 – « La lutte contre les aléas climatiques au Burkina Faso : acquis et défis de l'agroécologie dans la Région Nord ». In Dia A.,

Duponnois R. (éd.) : *La grande muraille verte : capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*, Marseille, IRD Éditions : 265-317.

BODNAR F., 2005 – *Monitoring for impact. Evaluating 20 years of SWC in southern Mali*. Doct. Thesis, Wageningen Univ., 219 p.

- BOLI Z., ROOSE É., 1998** – Degradation of a sandy Alfisol and restoration of its productivity under cotton/maize intensive cropping rotation in the wet savannah of Northern Cameroon. *Advances in Geocology*, Reiskirchen, 31 : 395-401.
- BOUZOU-MOUSSA I., DAN LAMSO N., 2004** – Le « tassa » : une technique de CES bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glacis des régions semi-arides (Niger). *Revue de Géographie Alpine*, 92 : 61-70.
- CRITCHLEY W., REIJ C., TURNER S., 1992** – *Soil & water conservation in sub Saharan Africa. Towards sustainable production by the rural poor*. Amsterdam, Free University, Ifad/CDCS, 110 p.
- DESBOS R., MOUNKAILA A., AKOTÉY A., DJIBO H., DERIAZ D., MONIMART M., 1989** – « Demi-lunes, barrages seuils, agroforesterie à Ourihamiza, Tahoua, Niger ». In Rochette R. (éd.) : *Le Sahel en lutte contre la désertification*, GTZ et Cills éditeurs : 33-52.
- DIALLO D., BOLI Z., ROOSE É., 2008** – « Influence of no-tillage on soil conservation, carbon sequestration and yield of intensive rotation maize-cotton: research on sandy Alfisols of Cameroon & Mali ». In Goddard T., Zoebish M., Gan Y., Ellis W., Watson A., Sombatpanit S. (eds) : *No-till farming systems*, Waswac, special Publ N° 3 : 383-392.
- DIATTA M., FAYE E., GROUZIS M., PEREZ P., 2012** – « Rôle des haies vives antiérosives sur la gestion de l'eau, du sol et des rendements des cultures du Centre-Sud arachidier du Sénégal ». In Roose É., De Noni G., Duchaufour H. (éd.) : *LAE et restauration de la productivité des sols et la protection contre les pluies cycloniques*, CDROM édité par IRD Montpellier et AUF Paris, 14 p.
- DROUX D., 2008** – *Réhabilitation des sols dégradés des zones sèches sahéliennes avec la technique du zaï. État des connaissances, perception et pratiques paysannes dans le nord du Burkina Faso*. Mémoire master II, univ. Paris XII, 63 p.
- DUCHAUFOUR H., GUIZOL P., BIZIMANA M., PELTIER R., POUILLOUX C., 1996** – Avantages et inconvénients de la haie mixte *Calliandra-Setaria* comme dispositif CES en milieu rural burundais. *Bull. Réseau Érosion Orstom*, 16 : 16 p.
- DUGUÉ P., 1986** – *L'utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village. Perspective de développement de petits périmètres irrigués de saison des pluies et de saison sèche*. Montpellier, Cirad/DSA, coll. Systèmes Agraires, 6, et Cahier Recherche Développement, 14 : 59-67.
- DUGUÉ P., ROOSE É., RODRIGUEZ L., 1993** – L'aménagement de terroirs villageois et l'amélioration de la productivité agricole au Yatenga (Burkina Faso). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 385-402.
- DUGUÉ P., RODRIGUEZ L., OUOBA B., SAWADOGO I., 1994** – *Techniques d'amélioration de la production agricole en zone soudano-sahélienne : manuel à l'usage des techniciens du développement rural, élaboré au Yatenga, Burkina Faso*. Montpellier, Cirad-SAR, 209 p.
- FATONDI D., MARTIUS C., ZOUGMORE R., VLEK P., BIELDERS C., KOALA S., 2009** – Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zaï technique in the Sahel. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 85 : 225-239.
- GRAAFF J. DE, STROOSNIDER L., 1995** – Évaluation économique des mesures de CES au Sahel. *Bull. Réseau Érosion*, 15 : 254-265.
- HIEN F. G., 1995** – *La régénération de l'espace sylvo-pastoral au Sahel. Une étude de l'effet des mesures de CES au Burkina Faso*. Doct. Thesis, Wageningen Agric. Univ., The Netherlands, 223 p.
- HIEN E., KABORÉ W., MASSE D., DUGUÉ P., 2012** – « Apports organiques et pratiques de conservation de l'eau comme clés de la restauration de la productivité des sols dégradés dans la zone semi-aride du Burkina Faso ». In Roose É., Duchaufour H., De Noni G. (éd.) : *Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*, CDrom, Marseille, IRD Éditions, 420 p.
- HUDSON N., 1991** – Reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bulletin*, 64, 65 p.
- KABORÉ V., 1995** – *Amélioration de la production végétale des sols dégradés (zipellés) du Burkina Faso par la technique du zaï*. Thèse doct., Epfel n° 1302, Lausanne Suisse, 201 p.
- KABORÉ W., 2005** – *Pratiques d'utilisation de la fumure organique dans les systèmes de culture et viabilité de l'agrosystème : cas du zaï au Burkina Faso*. Thèse de Master Science, Cnearc, Montpellier, 96 p.
- KABORÉ R., 2009** – *Dispositifs locaux de régulation, conflits fonciers et logiques d'acteurs dans le cadre d'un projet d'aménagement et de gestion des*

ressources (centre-nord du Burkina Faso). Institut de hautes études internationales et du développement, 332 p.

KÖNIG D., 2015 – « Effets de l'agroforesterie, la fertilisation et les haies vives sur les risques d'érosion et de ruissellement et sur la productivité d'un sol acide (ultisol) du Rwanda ». In Roose É. (éd.) : *La restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Marseille, IRD Éditions.

LAHMAR R., YACOUBA H., 2012 – « Zaï et potentiel de l'association cultures annuelles-arbustes natifs ». In Dia A., Duponnois R. (éd.) : *La grande muraille verte*, Marseille, IRD Éditions, 493 p. : 203-223.

LAL R., 2008 – Soils and sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 28 : 57-64.

LAMACHÈRE J. M., SERPANTIÉ G., 1990 – « Valorisation agricole des eaux de ruissellement et LAE sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne (Bidi, Burkina Faso) ». In « Utilisation rationnelle de l'eau de petits BV en zones arides », Journées scientifiques Aupelf, Ouagadougou, BKF.

LOUPPE D., 1991 – *Guiera senegalensis* ; espèce agroforestière ? Micro-jachère dérobée de saison sèche et approvisionnement énergétique d'un village du centre-nord du bassin arachidier sénégalais. *Rev. Bois et Forêts des Tropiques*, 228 : 41-47.

MANDO A., BRUSSAARD L., STROOSNIJDER L., 1999 – Termite and mulch-mediated rehabilitation on crusted soil in West Africa. *Restoration Ecology*, 7 (1) : 33-41.

MARCHALL J. Y., 1986 – Vingt ans de LAE au Burkina Faso. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 173-180.

MAZZUCATO V., NIEMEIJER D., 2000 – *Rethinking SWC in a changing society: a case study in Eastern Burkina Faso*. Doct. Thesis, Wageningen Agric. Univ., 380 p.

NDAYIZIGIYE F., 2015 – « Haies vives de légumineuses arbustives et fumures pour la restauration de la productivité des sols acides au Rwanda ». In Roose É. (éd.) : « *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, Marseille, IRD Éditions.

PIERI C., 1989 – *Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 ans de recherches et de développement au sud du Sahara*. Cirad Montpellier et Min. Coop. et Dév., 444 p.

PRESSOIR G., 2012 – « Potentiel du *Jatropha gurka* pour le développement économique, le reboisement et l'aménagement de bassins versants en Haïti ». In Roose É., De Noni G., Duchaufour H. (éd.) : *Lutte antiérosive et restauration de la productivité des sols et la protection contre les pluies cycloniques*, CDRom édité par IRD Montpellier et AUF Paris, 434 p.

REIJ C., 2005 – « Investing in Africa's drylands: impact on agriculture, environment and poverty reduction ». In Ruben R., De Steenhuisen B. (eds) : *Rural development in sub-Saharan Africa: policy perspective for sustainable resources management and poverty reduction*, KIT, Bulletin, 370 : 21-30.

ROCHETTE R., 1989 – *Le Sahel en lutte contre la désertification : leçons d'expériences*. Ouvrage collectif GTZ, Cills, 592 p.

ROOSE É., BERTRAND R., 1971 – Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion en Afrique de l'Ouest. *L'agronomie Tropicale*, 26 (11) : 1270-1283.

ROOSE É., 1976 – *Contribution à l'étude de l'influence de la mésofaune sur la pédogenèse actuelle en milieu tropical*. Abidjan, Rapport Orstom, 56 p.

ROOSE É., 1992 – « Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols ». In Le Floch E., Grouzis M., Cornet A., Bille J. C. (éd.) : *L'aridité, une contrainte au développement*, Montpellier, Orstom, coll. Didactiques : 481-506.

ROOSE É., 1993 – Innovations dans la conservation et la restauration des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 147-155.

ROOSE É., 1994 – Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES). *Bull. FAO des sols*, 70, 420 p.

ROOSE É., BERTRAND R., 1971 – Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion en Afrique de l'Ouest. *L'agronomie Tropicale*, 26 (11) : 1270-1283.

ROOSE É., KABORÉ V., GUÉNAT C. L., 1993 – Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 28 (2) : 159-173.

ROOSE É., NDAYIZIGIYE F., 1996 – Agroforestry and GCES in Rwanda. *Soil Technology*, 11 (1) : 109-119.

- ROOSE É., KABORÉ V., GUÉNAT C., 1999** – Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13 : 343-355.
- ROOSE É., BARTHÈS B., 2006** – « Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions ». In Roose É., Lal R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (eds) : *Soil erosion and carbon dynamic*, Advances in soil Science, CRC, Boca Raton, FL. USA : 55-72.
- ROOSE É., SABIR M., LAOUIA A., 2010** – *Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc. Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. Montpellier, IRD Éditions, 343 p.
- ROOSE É., BELLEFONTAINE R., VISSER M., 2011** – Six rules for the rapid restoration of degraded lands: synthesis of 17 case studies in tropical and Mediterranean climates. *Sécheresse*, 22 (3) : 1-12.
- SAWADOGO H., ZOMBRE P., BOCK L., LACROIX D., 2008** – Évolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir des photos aériennes. *Revue Télédétection*, 8 (1) : 59-73.
- SERPANTIÉ G., LAMACHÈRE J. M., 1989** – *Aménagement des pentes cultivées soudano-sahéliennes grâce à des réseaux de micro-barrages isohypes filtrants*. Isco 6, Addis Abeba, Éthiopie, 10 p.
- SOMÉ D., ZOMBRÉ P., ZOMBRÉ G., MAXAULEY H., 2004** – Impact de la technique du zaï sur la production de niébé et sur l'évolution des caractéristiques chimiques des sols dégradés (*zipellés*) du Burkina Faso. *Sécheresse*, 15 (3) : 8 p.
- SPAAN P., 2003** – *Consuming the savings: water conservation in a vegetation barrier system at the Central Plateau in Burkina Faso*. Doct. Thesis, Wageningen Univ., 207 p.
- STROOSNIJDER L., 1998** – Quantification of nutrient erosion. *Geokodynamik*, 18 : 215-229.
- STROOSNIJDER L., HOOGMOED B., 1984** – Crust formation on sandy soils in the Sahel. II. Tillage and its effect on the water balance. *Soil & Tillage Research*, 4 : 321-337.
- TEMESGEN B., STERK G., TEMESGEN M., ABDULKADIR A., STROOSNIJDER L., 2012** – Rainwater harvesting & management in rainfed agricultural systems in sub-Saharan Africa: a review. *Physics & Chemistry of the earth*, 48 : 139-151.
- WEZEL A., BÖCKER R., 1999** – Mulching with branches of an indigenous shrub (*Guiera senegalensis*) and yield of millet in semi-arid Niger. *Soil Till. Res.*, 50 : 341-344.
- WRIGTH P., 1982** – *La gestion des eaux de ruissellement*. Oxfam-ORD Yatenga (BKF), projet agroforestier, Ouagadougou, 25 p.
- ZOUGMORE R., ZIDA Z., KAMBOU N., 2003** – Role of nutrient amendments in the success of half-moon SWC practice in semi-arid Burkina Faso. *Soil Till. Res.*, 71 : 143-149.
- ZOUGMORE R., OUATTARA K., MANDO A., OUATTARA B., 2004** – Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sécheresse*, 15 (1) : 41-48.
- ZOUGMORE R., MANDO O., STROOSNIJDER L., OUEDRAOGO E., 2008** – « Rentabilité économique de la combinaison des mesures de CES avec la gestion des nutriments en zone semi-aride du Burkina Faso ». In Roose É., Albergel J., De Noni G., Laouina A., Sabir M. (éd.) : *Efficacité de la GCES en zones semi-arides*, Éditions AUF-EAC, IRD, 425 p. : 126-134.
- ZOUGMORE R., MANDO A., STROOSNIJDER L., 2009** – Soil nutrient and sediment loss as affected by erosion barriers and nutrient source in semi-arid Burkina Faso. *Arid Land Research and Management*, 23 : 85-101.

